

**MINIMIZACIÓN DE THD EN REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA  
MEDIANTE IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL EN ESPACIO VECTORIAL  
EN INVERSORES DE POTENCIA**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:  
MINIMIZACIÓN DE THD EN REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA  
MEDIANTE IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL EN ESPACIO VECTORIAL  
EN INVERSORES DE POTENCIA**

**AUTOR:  
FRANCISCO JAVIER VACA DÁVALOS**

**DIRECTOR:  
MANUEL DARIO JARAMILLO MONGE**

**Quito, Agosto 2021**

Francisco Javier Vaca Dávalos

**MINIMIZACIÓN DE THD EN REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA  
MEDIANTE IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL EN ESPACIO VECTORIAL  
EN INVERSORES DE POTENCIA**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2021  
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



**Francisco Javier Vaca Dávalos** (Y'1992). Realizó sus estudios secundarios en la Unidad Educativa Paulo VI, se graduó de bachiller en especialidad Físico-Matemático. Egresado de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se fundamenta en la Minimización de THD en redes de distribución eléctrica mediante implementación de control en espacio vectorial en inversores de potencia.

[fvacad@est.ups.edu.ec](mailto:fvacad@est.ups.edu.ec)

*Dirigido por:*



**Manuel Dario Jaramillo Monge** (Y'1990). Realizó sus estudios superiores en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE de Quito, donde se graduó de Ingeniero Electrónico en Automatización y Control en el 2014. Además, cursó estudios de posgrado en la Universidad de Newcastle, Reino Unido, donde obtuvo el título en Máster en Electrical Power. Actualmente es profesor ocasional a tiempo completo de la Universidad Politécnica Salesiana.

[mjaramillo@ups.edu.ec](mailto:mjaramillo@ups.edu.ec)

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

**DERECHOS RESERVADOS**

©2021 Universidad Politécnica Salesiana  
QUITO - ECUADOR

## DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Manuel Dario Jaramillo Monge declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *MINIMIZACIÓN DE THD EN REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA MEDIANTE IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL EN ESPACIO VECTORIAL EN INVERSORES DE POTENCIA* realizado por Francisco Javier Vaca Dávalos obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito D.M., Agosto de 2021

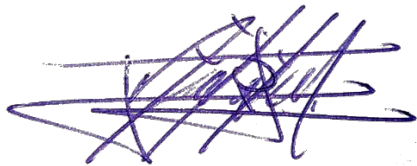


.....  
Manuel Dario Jaramillo Monge  
C.C.: 1714298005

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Francisco Javier Vaca Dávalos, con documento de identificación N° 1719049049, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: *MINIMIZACIÓN DE THD EN REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA MEDIANTE IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL EN ESPACIO VECTORIAL EN INVERSORES DE POTENCIA*, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



.....

Francisco Javier Vaca Dávalos

C.C.: 1719049049

Quito, D.M., Agosto 2021

## ÍNDICE GENERAL

Resumen.....	1
Abstract .....	1
1    Introducción .....	2
2    Marco teórico.....	2
2.1    Sistemas de Distribución .....	2
2.1.1    Perturbaciones .....	3
2.1.2    Distorsión Armónica Total .....	3
2.2    Generación Distribuida .....	4
2.2.1    Generación fotovoltaica .....	4
2.3    Inversores de Potencia .....	4
2.3.1    Inversor de medio puente. ....	5
2.3.2    Inversor puente completo.....	5
2.3.3    Inversor de Voltaje Trifásico .....	5
2.4    Control espacio vectorial .....	6
3    Planteamiento del Problema.....	6
3.1    Formulación del problema.....	6
3.2    Implementación del método de solución. ....	7
3.3    Casos de Estudio.....	8
3.3.1    Sistema de Distribución IEEE 34 barras con cargas no lineales (CNL). ....	8
3.3.2    Acople de DG con control de inversión de Inyección del Tercer armónico. 10	
3.3.3    Acople de DG con control de inversión Espacio Vectorial.....	11
4    Análisis de resultados .....	12
4.1    Análisis y comparación de resultados, casos de estudio 3.2.1 y 3.2.2. ...	12
4.2    Análisis y comparación de resultados, casos de estudio 3.2.1 y 3.2.3. ...	12
4.3    Análisis y comparación de resultados, casos de estudio 3.2.2 y 3.2.3. ...	13
5    Conclusiones.....	13
6    Recomendaciones.....	14
7    Trabajos Futuros.....	14
8    Referencia.....	14
9    Estado del Arte.....	17
9.1    Resumen de Indicadores .....	20

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Circuito Inversor de medio puente .....	5
Figura 2. Circuito inversor puente completo.....	5
Figura 3. Circuito inversor trifásico.....	6
Figura 4. Posición de los posibles vectores de tensión de conmutación. ....	6
Figura 5. Modelo del controlador en Simulink. ....	8
Figura 6. Sistema de prueba IEEE de 34 barras y ubicación de cargas no lineales. .....	9
Figura 7. Ubicación DG e inversor de potencia THPWM. ....	10
Figura 8. Ubicación DG e inversor de potencia SVPWM. ....	11
Figura 9. Comparación de Voltaje en la barra 25 de los casos 3.2.1 vs 3.2.2. ..	12
Figura 10. Comparación de THD caso 3.2.1 vs 3.2.2.....	12
Figura 11. Comparación de Voltaje en la barra 25 de los casos 3.2.1 vs 3.2.3. 12	
Figura 12. Comparación de THD caso 3.2.1 vs 3.2.3.....	13
Figura 13. Comparación de Voltaje en la barra 25 de los casos 3.2.2 vs 3.2.3. 13	
Figura 14. Comparación de THD caso 3.2.2 vs 3.2.3.....	13
Figura 15. Resumen e indicador de la temática. ....	20
Figura 16. Indicador de formulación de problema. ....	21
Figura 17. Indicador de Solución. ....	21



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables y Notación .....	7
Tabla 2. Valores de sintonización. ....	8
Tabla 3. Parámetros de voltaje sistema IEEE 34 barras. ....	9
Tabla 4. Parámetros de THD Sistema IEEE 34 Barras. ....	9
Tabla 5. Parámetros de voltaje Sistema IEEE de 34 barras con cargas no lineales. .....	10
Tabla 6. Parámetros de THD Sistema IEEE de 34 barras con cargas no lineales. .....	10
Tabla 7. Parámetros de voltaje sistema con DG y THPWM. ....	10
Tabla 8. Parámetros de THD sistema con DG y THPWM. ....	11
Tabla 9. Parámetros de voltaje sistema con DG y SVPWM. ....	11
Tabla 10. Parámetros de THD sistema con DG y SVPWM. ....	11
Tabla 11. Matriz de estado del arte. ....	17

# MINIMIZACIÓN DE THD EN REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA MEDIANTE IMPLEMENTACIÓN DE CONTROL EN ESPACIO VECTORIAL EN INVERSORES DE POTENCIA

## Resumen

La energía eléctrica es crucial para hacer viable el funcionamiento de la matriz productiva del país, al igual que para llevar a cabo funciones de primera necesidad en nuestros hogares, por tanto, la calidad energética radica en ofrecer al usuario un servicio eficaz, que cumpla con las expectativas generadas, esto implica optimizar los procesos fundamentales de un sistema eléctrico de potencia, como son la generación, transmisión y distribución. Bajo esta premisa con el fin de mejorar la calidad de la red de distribución, este documento abarca el análisis e implementación del control espacio vectorial en inversores de generación distribuida fotovoltaica de en un sistema de 34 barras IEEE y su eventual aplicación para minimizar la distorsión armónica total (THD) generada convencionalmente por aparatos electrónicos de uso diario conectados al sistema eléctrico. Se aplicó un control de 6 vectores fundamentales en la técnica de modulación, sobre un inversor de puente completo que se conecta a la barra número 25 del sistema, mediante simulación por bloques se concluye que los resultados alcanzados coinciden con las expectativas generadas, en virtud de que ambas técnicas de modulación en la DG integrada tanto en THPWM como SVPWM mejoran los parámetros de estabilidad de la red de distribución planteada.

**Palabras Clave:** Distorsión armónica total, redes de distribución de potencia, convertidores de potencia CC-CA, inversores, modulación de ancho de pulso de vector espacial

## Abstract

Power Energy is crucial for a viable functioning of the productive matrix in a country, as well as to carry out essential functions in our homes, therefore, energy quality lies in offering an effective service for users, which meets the expectations generated, this implies optimizing the fundamental processes of an electrical power system, such as generation, transmission, and distribution. Under this premise to improve quality of distribution network, this document goal is the analysis and implementation of vector space control in photovoltaic distributed generation inverters on an IEEE 34-bar system and its eventual application to minimize total harmonic distortion (THD) conventionally generated by daily electronic devices connected to the electrical system. A control of 6 fundamental vectors is applied in the modulation technique, on a complete bridge inverter that is connected to the number 25 bar of the system by block simulation. It is concluded that the results achieved coincide with the expectations generated, since both modulation techniques in the integrated DG in both THPWM and SVPWM improve the stability parameters of the proposed distribution network.

**Keywords:** Total harmonic distortion, Power distribution networks, DC-AC power converters, inverters, Space vector pulse width modulation

# 1 Introducción

Las redes de distribución son responsables de transportar la electricidad hacia zonas comerciales, industriales y residenciales. La tensión debe contar con ciertas características para que los terminales funcionen correctamente, incluidas el nivel de voltaje y la frecuencia, la alteración de estos factores puede resultar en enormes quebrantos de eficiencia energética. La propuesta de nuevas estructuras e instalación de nuevos dispositivos que afiancen la sostenibilidad y eficiencia en las redes de energía apunta a la integración de una generación distribuida mediante inversores basados en electrónica de potencia [1].

Los aparatos electrónicos de uso diario son en su mayoría sensibles al nivel de calidad de energía y simultáneamente son responsables del deterioro de esta, las perturbaciones en la disposición energética se originan en la red o son ocasionadas por los mismos usuarios, lo que conduce a inconvenientes significativos y grandes pérdidas económicas para los consumidores [2].

Los problemas de distorsión de la forma de onda no son tan dañinos como la caída de voltaje. Sin embargo, una mayor aplicación de la tecnología electrónica de potencia en los dispositivos aumenta los niveles de distorsión en las redes de distribución, lo que puede conducir a un nivel inaceptable de calidad energética en términos de armónicos [3]. La demanda en continuo crecimiento de consumo de energía y producción local hace que la red opere más cerca de los estándares eléctricos del sistema, lo que puede conducir a problemas de armónicos más importantes [4]. El propósito de esta investigación es mejorar la calidad de la

energía en las redes de distribución mediante la aplicación de técnicas de control de conversión avanzadas en los inversores de potencia que se pueden encontrar en la red [5], se analizará con énfasis la distorsión que se genera por la presencia de aparatos electrónicos en el sistema mediante el control de espacio vectorial en inversores de generación distribuida fotovoltaica, con ello se pretende disminuir la Distorsión Armónica Total (THD) del sistema de prueba y comparar con los escenarios de inversión de inyección del tercer armónico [6].

A continuación, el artículo contará con la siguiente estructura: en la sección II se efectúa el soporte contextual en cuanto a sistemas eléctricos de potencia (SEP), inversores de potencia, distorsión armónica total (THD) y control espacio vectorial. En la sección III, se plantea el modelo de distribución IEEE de 34 barras, sus valores nominales, las técnicas de control a ser empleadas, además se presentan los casos de estudio. En la sección IV. Se presenta el análisis de resultados, comparando los diferentes casos de estudio planteados mediante gráficas. En la sección V se exponen las conclusiones producto de la investigación.

## 2 Marco teórico

### 2.1 Sistemas de Distribución

Un sistema eléctrico de potencia (SEP) posee diversos elementos que componen las partes principales del mismo, en resumen, un SEP se constituye en: generación, transmisión y distribución, cada una de ellas son fundamentales al momento de garantizar el abastecimiento a las redes de distribución [7]. La generación puede estar compuesta por cualquier tipo de maquina rotatoria, o de energía alternativa que, mediante

procesos de inversión de onda, transforma su energía para poder acoplarse a una red o sistema. Por otro lado, el proceso de transmisión consiste en trasladar toda la energía que produce el sistema, evitando al máximo cualquier tipo de pérdida o eventualidad que se pueda producir durante este proceso. Por último, la distribución se encarga de transformar la energía, para que el consumidor pueda hacer uso de ella, evitando de igual forma, cualquier pérdida o suceso que pueda interrumpir suplir el suministro energético, pero a menor escala [7].

La distribución de energía eléctrica tiene como objetivo la dosificación de energía a los consumidores, por tanto, está en constante evolución, desde las herramientas empleadas, tipo de estructuras, tipo de equipos, técnicas de trabajo de las cuadrillas de mantenimiento, materia prima con la que se construyen las redes de distribución, entre otros [8]. Esta parte del sistema tiende a ampliarse progresivamente con la creciente poblacional, debido a esto, aplicar mantenimiento preventivo es casi imposible, por lo general, se realizan mantenimientos correctivos, ya que instalar un sistema preventivo focalizado en una red tan amplia, implica costos de inversión elevados, además los materiales empleados en estos sistemas no son tan robustos comparados con la etapa de transmisión; estos tienden a fallar con mayor frecuencia y al trabajar con niveles más bajos de tensión y elevadas cantidades de elementos, se produce la mayoría de pérdidas del sistema [7].

### **2.1.1 Perturbaciones**

En términos de voltaje consiste en los cambios bruscos que puede padecer el mismo debido a agentes ambientales, físicos planeados o no planeados, entre

estos las señales armónicas que crean una distorsión en la corriente y el voltaje [9].

### **2.1.2 Distorsión Armónica Total**

El armónico se define como el componente sinusoidal de una forma de onda compleja cuya frecuencia es un múltiplo integral de la frecuencia fundamental. Aunque los sistemas de corriente alterna (AC) inicialmente aspiran a operar con señales sinusoidales, la forma de onda puede ser distorsionada por las siguientes fuentes armónicas [1],[2].

- Los controladores de flujo de potencia basados en la electrónica de potencia inyectan corrientes no lineales debido a los convertidores AC/DC y DC/AC.

- Los aparatos no lineales que contienen convertidores de electrónica de potencia provocan una distorsión de la forma de onda.

- Los reactores, transformadores y motores de inducción con núcleo magnético producen corrientes debido al proceso de saturación.

La distorsión armónica puede originar problemas graves, como sobrecalentamiento y falla de equipos, caídas en el funcionamiento de aparatos sensibles, falso disparo de relés de protección e interferencia con las señales de comunicación.

Habitualmente, el espectro armónico, que es una abstracción matemática de una señal constituida por una serie de componentes sinusoidales puros con diferentes frecuencias, se utiliza para estudiar la distorsión de la forma de onda [6]. Además de los armónicos, algunos componentes espectrales poseen frecuencias que son múltiplos no enteros que se definen como interarmónicos. En la mayoría de escenarios y tiempo, los niveles de interarmónicos son mucho más bajos que los armónicos, por lo que

regularmente se ignoran en el análisis. [10]. Los niveles generales de armónicos se pueden detallar con la distorsión armónica total (THD), que se calcula como (1) para [11]:

$$\%THD_U = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^H U_h^2}{U_1^2}} \cdot 100\% \quad (1)$$

Donde:

$U_1$  Magnitud de voltaje fundamental

$U_h$  Magnitud del voltaje armónico de h-ésimo orden

$H$  Orden armónico más alto

## 2.2 Generación Distribuida

Se entiende como cualquier fuente de potencia activa acoplada indistintamente a una red de distribución [12]. Aporta ventajas económicas, técnicas y ambientales, apoya también con el suministro de la demanda a corto y largo plazo. Según su ubicación en la red se incrementa la confiabilidad del sistema y minimización de pérdidas [13]. Según el recurso energético de origen se clasifica en generación convencional y no convencional estas pueden ser fotovoltaica, eólica, ciclo combinado, cogeneración, micro turbinas y células de combustible [14]. Se promueve la generación distribuida alternativa debido a su pequeña escala en la red, factibilidad de conexión y su reducida huella ambiental, puede estar conectada cerca de la carga o sobre ella [15].

### 2.2.1 Generación fotovoltaica

El mayor recurso energético renovable existente en la naturaleza es el sol, transformar luz en electricidad trae consigo un concepto ambivalente en cuanto a la abundancia del recurso [16], pero el precario rendimiento energético y elevados costos de generación del mismo, a pesar de esto el bajo costo

operacional subsana su alto costo de inversión.

La mayoría de energía solar que alcanza una celda se pierde antes de que esta pueda ser convertida en electricidad, la máxima eficiencia de conversión energética en una celda fotovoltaica no supera el 30 %, sin embargo, el valor típico de eficiencia alcanza un rango del 10% al 15% [17].

La disposición de un parque solar radica en la alineación de módulos por circuitos en serie para alcanzar el voltaje DC requerido, la potencia se obtiene al conectar varias cadenas en paralelo [16].

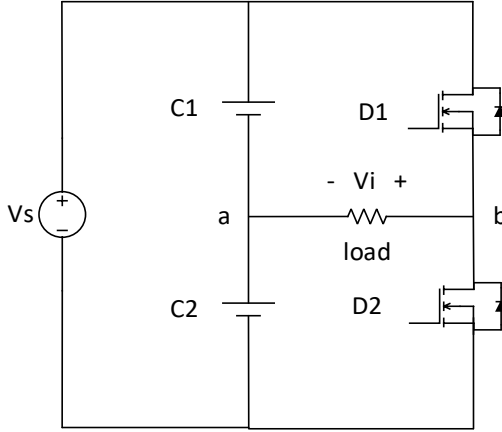
## 2.3 Inversores de Potencia

Un inversor de potencia posee la función de convertir el voltaje de entrada que es una corriente directa a un voltaje de salida de corriente alterna que puede tener una frecuencia y amplitud variable. Varios rectificadores que controlan la modulación del ángulo de disparo trabajan con inversores [18]. Si la señal de entrada de voltaje es constante puede dar como resultado una señal de salida variable, modificando la ganancia del inversor, a esta técnica de control se la conoce como modulación por ancho de pulso (PWM). En teoría en la inversión DC/AC, la forma de onda de salida debería reflejar una señal senoidal perfecta, no obstante, los inversores reales generan e inyectan ciertos armónicos que pueden producir desperfectos en el sistema de potencia [19]; para sistemas de baja y mediana potencia puede existir distorsión en las señales, pero en sistemas de alta potencia es imperativo minimizar la distorsión armónica [20],[21].

Existen estrategias de conmutación que se llevan a cabo gracias a módulos semiconductores de alta velocidad, esto minimiza la producción de armónicos.

### 2.3.1 Inversor de medio puente.

La forma de inversión más básica es llevada a cabo por la configuración de medio puente [20].



**Figura 1.** Circuito Inversor de medio puente

Esta configuración está conformada por dos elementos de conmutación acoplados en serie D1 y D2, dos capacitores C1 y C2 conectados a una fuente de voltaje DC, posee una carga conectada en el centro del circuito en el punto ab.

La conmutación alterna de D1 y D2 genera la señal de salida por medio de la modulación del ángulo p. La activación se da en dos tiempos, D1 se activa en un tiempo  $T_i/2$ , el voltaje a través de la carga  $V_i$  adquiere el valor de  $V_s/2$  consecuentemente D2 se activa en un tiempo  $T_i/2$  adquiriendo ahora un valor de  $-V_s/2$  [20]. El voltaje eficaz  $V_i$  se obtiene de:

$$V_i = \sqrt{\frac{2}{T_i} \int_0^{T_i/2} \frac{V_s^2}{4} dt} = \frac{V_s}{2} \quad (2)$$

Donde:

$V_i$  Voltaje de salida

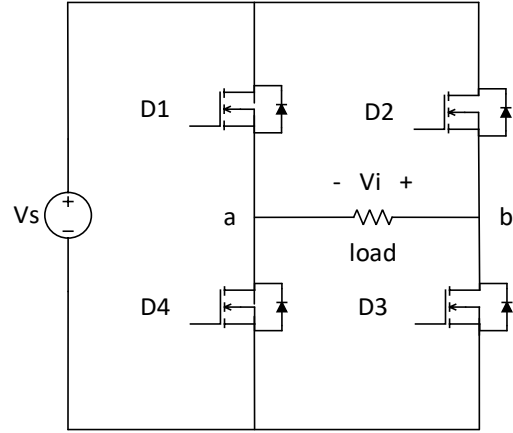
$V_s$  Voltaje DC de entrada

$T_i$  Tiempo de conmutación

### 2.3.2 Inversor puente completo

Producto de la unión de dos inversores de medio puente, este circuito figura de

cuatro elementos de conmutación D1, D2, D3, D4 y una fuente única [20].



**Figura 2.** Circuito inversor puente completo

Esta disposición despliega ventajas ante las otras topologías, dado que la carga acoge la tensión total de la fuente, a su vez, según la combinación de interruptores abiertos y cerrados D1D3 y D2D4, la carga puede albergar dos estados de voltaje, que en un tiempo controlado hacen posible el seguimiento de un control de potencia en la carga, por ende, de los armónicos generados [20]. El voltaje eficaz  $V_i$  se obtiene de:

$$V_i = \sqrt{\frac{2}{T_i} \int_0^{T_i/2} V_s^2 dt} = V_s \quad (3)$$

Donde:

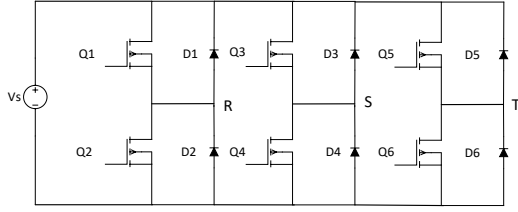
$V_i$  Voltaje de salida

$V_s$  Voltaje DC de entrada

$T_i$  Tiempo de conmutación

### 2.3.3 Inversor de Voltaje Trifásico

Es el resultado de la unión de tres inversores monofásicos. La diferencia fundamental es que, en lugar de tener una única señal modulada, existen tres señales moduladas sinusoidales, desfasadas  $120^\circ$  entre ellas, para el control de seis conmutadores Q1, Q2, Q3, Q4, Q5 y Q6 que conectan con las tres fases cómo se muestra en la figura 3 [22].



**Figura 3.** Circuito inversor trifásico.

Las seis secuencias de conmutación son Q1Q4, Q1Q6, Q6Q3, Q2Q3, Q2Q5, Q4Q5.

## 2.4 Control espacio vectorial

El SVPWM o control vectorial de inversores trifásicos alimentados por fuente de tensión constituye una herramienta eficaz para el desarrollo y control de los inversores de continua-alterna [23]. La técnica de inflexión de ancho de pulso del vector espacio consiste en emplear los diferentes vectores de tensión espaciales durante períodos determinados y en un orden categórico, según un vector de referencia que depende del sistema trifásico que se desea obtener, para de esa manera lograr que la señal de salida tenga una menor distorsión armónica [24].

La representación vectorial de un sistema trifásico se puede representar por tres magnitudes  $V_r$ ,  $V_s$  y  $V_t$  que dependen del tiempo, estos representan la ecuación [25]:

$$V_R(t) + V_S(t) + V_T(t) = 0 \quad (3)$$

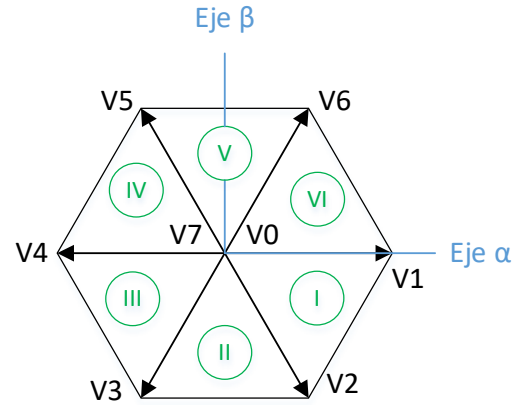
Donde:

$V_n$  Voltaje de cada fase

Las tres tensiones del sistema se pueden incorporar en un marco de referencia bidimensional a través de tres vectores espaciales, desfasados entre sí  $120^\circ$ .

La secuencia de conmutación puede brindar 8 posibles combinaciones, en la disposición del inversor trifásico tenemos tres conmutadores conectados al positivo de la fuente que se simbolizan

como vectores e identifican el estado de conmutación de los mismos [25],[26].



**Figura 4.** Posición de los posibles vectores de tensión de conmutación.

Para conseguir una señal cuadrada de salida de un inversor trifásico con el desfase angular pertinente, la secuencia de conmutación debe ser V6, V1, V2, V3, V4, V5, V6, V1. La dosificación del periodo de las señales es  $p/3$  para cada vector y el valor de la amplitud de salida viene dado por:

$$V_s = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} * V_{DC} \quad (3)$$

Donde:

$V_s$  Voltaje de salida

$V_{DC}$  Voltaje de entrada DC

Para modular la amplitud de salida se reduce el período de aplicación al introducir tiempos con vectores nulos como V0 o V7, la sumatoria de los tiempos debe dar como resultado el mismo valor del periodo de la onda que se pretende generar [25].

## 3 Planteamiento del Problema

### 3.1 Formulación del problema

Las perturbaciones más comunes en las redes de distribución son las caídas de tensión, interrupciones del sistema y distorsiones de onda, siendo las dos

primeras las más severas en términos financieros ya que resultan en la paralización de equipos, además del tiempo que se requiere para reiniciar el proceso. Se espera que un sistema de distribución ideal entregue al usuario formas de ondas sinusoidales perfectas a una frecuencia fundamental, donde la magnitud del voltaje se mantenga dentro de los límites preestablecidos [10]. El problema de la distorsión de onda que suele presentarse en los sistemas de distribución es provocado por el creciente uso de cargas no lineales en redes residenciales y por elementos de electrónica de potencia enlazados al sistema [10].

El aumento progresivo del consumo de energía conlleva a la implementación de generación distribuida, para suplir la demanda del sistema, generalmente está conectada cerca de la carga y su recurso energético es renovable. Al ser una generación no convencional precisa de inversores DC-AC para conectarse a la red inyectando un alto contenido armónico perturbando los estándares de calidad del suministro [1].

El objetivo principal del trabajo de estudio es minimizar el THD en un sistema de distribución de prueba [28], mediante la aplicación de control vectorial en un inversor de potencia que será acoplado a una generación distribuida fotovoltaica. En primer lugar, se realiza una medición de voltaje en todas las barras en el sistema de distribución, tras ello, se localizan 3 barras con menor el perfil de voltaje en las cuales se colocarán cargas no lineales. Posteriormente se acopla la generación distribuida fotovoltaica y el inversor de potencia, en una de estas barras para llevar a cabo el control vectorial. Por último, se procede a comparar y analizar los valores resultantes de THD y perfil de

voltaje, comprobando que en efecto se logre la minimización del THD.

Para obtener resultados optimizados, la función objetivo que se plantea se toma a partir de la ecuación 1 de THD:

$$\%THD_U = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^H U_h^2}{U_1^2}} * 100\%$$

La función consiste en la minimización en los valores de voltaje armónicos  $U_h$ , la cual se propone mediante la aplicación espacio vectorial con un arreglo de 6 vectores fundamentales al momento de la inversión. Las cargas no lineales se mantienen constantes, al igual que los valores del sistema de prueba, tanto en generación como en líneas de distribución. Se restringe el valor máximo de tensión para que la DG no supere el perfil de voltaje del sistema original. Posterior a la aplicación SVPWM se medirán los valores de THD en una barra de referencia para compararlos con el sistema original y constatar que la función objetivo cumpla con su cometido.

### 3.2 Implementación del método de solución.

El sistema de prueba y modulación de inversión serán diseñados en Matlab-Simulink a través de programación de bloques. En la tabla 1 se pueden observar las variables que se usaran para desarrollar el pseudocódigo del presente trabajo. El Algoritmo 1 detalla el proceso de modulación vectorial que se incorpora en el inversor, este proceso se repite para cada una de las fases.

**Tabla 1.** Variables y Notación

Nomenclatura	
$V_{DCref}$	Voltaje DC de referencia
$V_{refin}$	Voltaje de red
$I_{refin}$	Corriente de red
$wt_{Vref}$	Ángulo de voltaje



$wt_{Iref}$	Ángulo de corriente
$ki_V$	Constante integral de voltaje
$kp_V$	Constante proporcional de voltaje
$ki_I$	Constante integral de corriente
$kp_I$	Constante proporcional de corriente

En primera instancia se toma los valores de referencia tanto del sistema como del voltaje de la generación distribuida, ya que estas delimitan la amplitud de la onda. Se procede a definir los vectores fundamentales para el control espacio vectorial a partir de los ángulos de cada fase, una vez definidos se realiza un contraste entre el valor de referencia y el valor que está ingresando al inversor, mientras sea mayor que 0 se multiplica por los valores de sintonización de cada controlador los cuales al final entregaran una magnitud de salida que juntamente con los vectores originan la modulación vectorial. Este proceso sigue hasta que la función condicional pueda seguir en marcha, caso contrario la modulación de la amplitud ha llegado a su máximo valor.

**Algoritmo 1.** Control vectorial en inversor de puente completo.

Paso 1	Inicio
Paso 2	Ingreso de Datos $V_{DCref}, V_{refin}, I_{refin}, wt_{Vref}, wt_{Iref}$
Paso 3	Comparación y modulación de amplitud $ V_{ref}  =  V_{refin}  -  V_{refout} $ $ I_{ref}  =  I_{refin}  -  I_{refout} $ <b>Para</b> $i=1$ <b>Hasta</b> 6 <b>Hacer</b> $[wti_{Vref}] = [i * \frac{1}{3}\pi]$ <b>Fin para</b> <b>Para</b> $j=1$ <b>Hasta</b> 6 <b>Hacer</b> $[wtj_{Iref}] = [j * \frac{1}{3}\pi]$ <b>Fin para</b> <b>Si</b> $V_{ref} > 0$ $(V_{ref} * [ki_V kp_V] + V_{DCref}) = V_{refaux}$ $[V_{refout}] = [(V_{refaux}, wti_{Vref})]$ <b>Si</b> $I_{ref} > 0$ $I_{ref} * [ki_I kp_I] = I_{refaux}$

3.3.1

$$[I_{refout}] = [(I_{refaux}, wtj_{Vref})]$$

**Fin Si**  
**Fin Si**

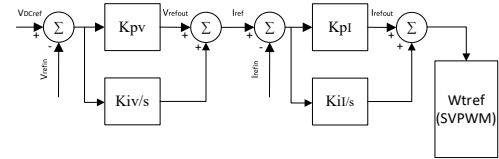
Paso 4 FIN

Los valores de sintonización de los controladores PI se los puede observar en la tabla 2, estos fueron obtenidos mediante un proceso de prueba y error, partiendo de los valores predeterminados de un bloque inversor que se encuentra disponible en Simulink. Hasta lograr el resultado deseado a la salida del inversor.

**Tabla 2.** Valores de sintonización.

	Kp	Ki
Voltaje	7	800
Corriente	0.3	20

La modulación se implementará en un bloque de control tomando en cuenta los valores de referencia, la cual estará conectada a un inversor de puente completo como se observa en la figura 5.



**Figura 5.** Esquema del controlador.

### 3.3 Casos de Estudio

#### Sistema de Distribución IEEE 34 barras con cargas no lineales (CNL).

El sistema que se usará en el presente trabajo es el modelo IEEE de 34 barras, que servirá como modelo de una red de distribución para ejecutar las simulaciones de los diferentes casos de estudio planteados [27].

El sistema original está libre de cargas y será alimentado únicamente con un generador trifásico de 24.9 kV en la barra número 1, del cual serán tomadas como referencia tres barras con el mayor perfil de THD del sistema. Posteriormente, en

las barras de referencia se aplicará cargas no lineales, para poder evidenciar el cambio en el THD y finalmente colocar Generación Distribuida (DG) con dos técnicas de control de inversión y constatar cuales resultados logran el objetivo planteado.

**Tabla 3.** Parámetros de voltaje sistema IEEE 34 barras.

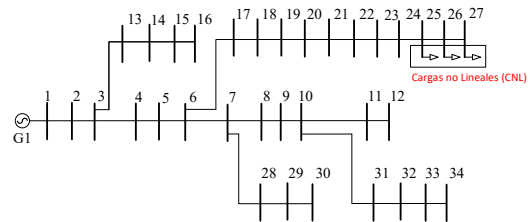
Barras	Voltaje P.U.	Barras	Voltaje P.U.
1	1,0000	18	0,9936
2	0,9990	19	0,9931
3	0,9982	20	0,9927
4	0,9969	21	0,9923
5	0,9958	22	0,9919
6	0,9947	23	0,9916
7	0,9935	24	0,9912
8	0,9932	25	0,9911
9	0,9929	26	0,9910
10	0,9927	27	0,9910
11	0,9927	28	0,9931
12	0,9926	29	0,9928
13	0,9981	30	0,9927
14	0,9980	31	0,9927
15	0,9980	32	0,9926
16	0,9980	33	0,9926
17	0,9941	34	0,9926

**Tabla 4.** Parámetros de THD Sistema IEEE 34 Barras.

Barras	THD	Barras	THD
1	0,5370%	18	0,5373%
2	0,5371%	19	0,5373%
3	0,5371%	20	0,5374%
4	0,5372%	21	0,5374%
5	0,5372%	22	0,5374%
6	0,5372%	23	0,5375%
7	0,5373%	24	0,5375%
8	0,5373%	25	0,5375%
9	0,5373%	26	0,5375%
10	0,5373%	27	0,5375%
11	0,5373%	28	0,5372%
12	0,5373%	29	0,5372%

13	0,5371%	30	0,5372%
14	0,5371%	31	0,5373%
15	0,5371%	32	0,5373%
16	0,5371%	33	0,5373%
17	0,5373%	34	0,5373%

Las barras donde se aplicarán las cargas serán 25, 26 y 27, ya que se puede observar en la tabla 1, que los perfiles de voltaje son los más bajos. Al igual que en la tabla 2 se verifica que los valores de THD son los más altos en las barras antes mencionadas. La DG estará colocada en la barra 25, siendo esta barra 25 el punto de referencia de este trabajo de investigación. Primero se aplicará la técnica de control de inyección del tercer armónico (THPWM), posteriormente con la técnica de control espacio vectorial (SVPWM) de un solo nivel [29], formando así 6 vectores base para la inversión de la generación que en este caso será un arreglo fotovoltaico de 1 MW de potencia, de esta forma se hará una comparación del perfil de voltaje y THD en la barra 25 para saber que técnica de modulación logra el mejor resultado.



**Figura 6.** Sistema de prueba IEEE de 34 barras y ubicación de cargas no lineales.

Las cargas que serán implementadas son de mayor potencia reactiva inductiva, para así obligar al sistema que se sobrecargue de armónicos y posteriormente comprobar que las técnicas de control surtan efecto en la red de distribución. Las características de las cargas son de 100 W Potencia Activa, 10 MVar Potencia Reactiva Inductiva y 1

kVar Potencia Reactiva Capacitiva [29]. Se colocará una carga en cada una de las barras 25, 26 y 27 como se muestra en la figura 6, con la misma generación del caso original de estudio.

### 3.3.2

**Tabla 5.** Parámetros de voltaje Sistema IEEE de 34 barras con cargas no lineales.

Barra	Voltaje P.U.	Barra	Voltaje P.U.
1	1.00000	18	0.9500
2	0.99253	19	0.9424
3	0.98902	20	0.9357
4	0.98032	21	0.9294
5	0.97266	22	0.9227
6	0.96520	23	0.9165
7	0.96402	24	0.9101
8	0.96375	25	0.9063
9	0.96344	26	0.9049
10	0.96329	27	0.9043
11	0.96323	28	0.9636
12	0.96321	29	0.9634
13	0.98897	30	0.9632
14	0.98887	31	0.9632
15	0.98886	32	0.9632
16	0.98886	33	0.9632
17	0.95715	34	0.9632

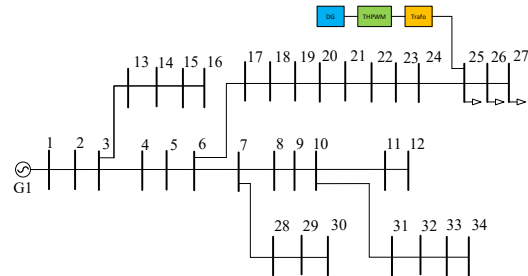
**Tabla 6.** Parámetros de THD Sistema IEEE de 34 barras con cargas no lineales.

Barra	THD	Barra	THD
1	0,5370%	18	0,5575%
2	0,5392%	19	0,5618%
3	0,5415%	20	0,5657%
4	0,5447%	21	0,5695%
5	0,5476%	22	0,5749%
6	0,5506%	23	0,5802%
7	0,5506%	24	0,5865%
8	0,5506%	25	0,5906%
9	0,5507%	26	0,5923%
10	0,5507%	27	0,5930%
11	0,5507%	28	0,5506%
12	0,5507%	29	0,5506%
13	0,5415%	30	0,5506%
14	0,5415%	31	0,5507%

15	0,5415%	32	0,5507%
16	0,5415%	33	0,5507%
17	0,5542%	34	0,5507%

### Acople de DG con control de inversión de Inyección del Tercer armónico.

La generación Distribuida Fotovoltaica se colocará en la barra 25, como se observa en la tabla 3 y 4, su valor de THD y perfil de voltaje son los más bajos del sistema, en su totalidad la DG es de energía fotovoltaica con 5 arreglos en paralelo, cada arreglo está conformado por 104 cadenas en paralelo y 5 módulos conectados en serie por cada cadena, entregando en total 500 VDC en su salida [30]. El THPWM debería mantener estable el perfil de voltaje, ya que el tercer armónico no perjudica la amplitud de onda. La incorporación de DG refuerza la confiabilidad del sistema, reduciendo perdidas en potencia y ofreciendo soporte en variaciones de carga o fallas ayudando así, a estabilizar el sistema[31]. Debido a la electrónica de potencia presente en la inversión de ondas, el valor de THD es la variable de mayor consideración para este caso de estudio.



**Figura 7.** Ubicación DG e inversor de potencia THPWM.

**Tabla 7.** Parámetros de voltaje sistema con DG y THPWM.

Barra	Voltaje P.U.	Barra	Voltaje P.U.
1	1,0000	18	0,9934

2	0,9989	19	0,9928
3	0,9981	20	0,9923
4	0,9968	21	0,9919
5	0,9956	22	0,9915
6	0,9945	23	0,9911
7	0,9933	24	0,9907
8	0,9930	25	0,9905
9	0,9927	26	0,9904
10	0,9926	27	0,9904
11	0,9925	28	0,9929
12	0,9925	29	0,9926
13	0,9981	30	0,9925
14	0,9980	31	0,9925
15	0,9980	32	0,9925
16	0,9980	33	0,9924
17	0,9939	34	0,9924

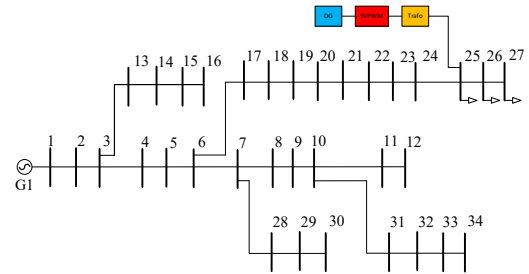
**Tabla 8.** Parámetros de THD sistema con DG y THPWM.

Barra	THD	Barra	THD
1	0,5370%	18	0,5375%
2	0,5371%	19	0,5376%
3	0,5372%	20	0,5377%
4	0,5372%	21	0,5378%
5	0,5373%	22	0,5379%
6	0,5374%	23	0,5380%
7	0,5374%	24	0,5381%
8	0,5374%	25	0,5381%
9	0,5375%	26	0,5382%
10	0,5375%	27	0,5382%
11	0,5375%	28	0,5374%
12	0,5375%	29	0,5374%
13	0,5372%	30	0,5374%
14	0,5372%	31	0,5375%
15	0,5372%	32	0,5375%
16	0,5372%	33	0,5375%
17	0,5375%	34	0,5375%

### 3.3.3 Acople de DG con control de inversión Espacio Vectorial.

Se acoplará la misma DG que el caso de estudio anterior, para evidenciar que modulación de inversión es la más eficaz

dadas las mismas condiciones. SVPWM aplica vectores fundamentales de una onda en un orden y tiempo determinados del sistema el cual se desea realizar la inversión, reduciendo así la distorsión armónica a la salida de la señal [26],[27]. El tiempo de muestro para el controlador es de 0.0001 segundos, voltaje nominal 500 VDC.



**Figura 8.** Ubicación DG e inversor de potencia SVPWM.

**Tabla 9.** Parámetros de voltaje sistema con DG y SVPWM.

Barra	Voltaje P.U.	Barra	Voltaje P.U.
1	1,0000	18	0,9934
2	0,9989	19	0,9928
3	0,9981	20	0,9923
4	0,9968	21	0,9919
5	0,9956	22	0,9914
6	0,9945	23	0,9911
7	0,9933	24	0,9907
8	0,9930	25	0,9905
9	0,9927	26	0,9904
10	0,9926	27	0,9904
11	0,9925	28	0,9929
12	0,9925	29	0,9926
13	0,9981	30	0,9925
14	0,9980	31	0,9925
15	0,9980	32	0,9925
16	0,9980	33	0,9924
17	0,9939	34	0,9924

**Tabla 10.** Parámetros de THD sistema con DG y SVPWM.

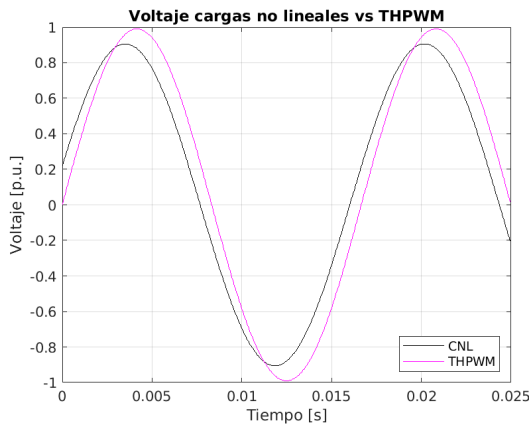
Barra	THD	Barra	THD
1	0,5316%	18	0,5324%

2	0,5321%	19	0,5314%
3	0,5325%	20	0,5302%
4	0,5329%	21	0,5286%
5	0,5331%	22	0,5258%
6	0,5331%	23	0,5222%
7	0,5331%	24	0,5170%
8	0,5331%	25	0,5128%
9	0,5331%	26	0,5109%
10	0,5331%	27	0,5101%
11	0,5331%	28	0,5331%
12	0,5331%	29	0,5331%
13	0,5325%	30	0,5331%
14	0,5325%	31	0,5331%
15	0,5325%	32	0,5331%
16	0,5325%	33	0,5331%
17	0,5328%	34	0,5331%

## 4 Análisis de resultados

### 4.1 Análisis y comparación de resultados, casos de estudio 3.3.1 y 3.3.2.

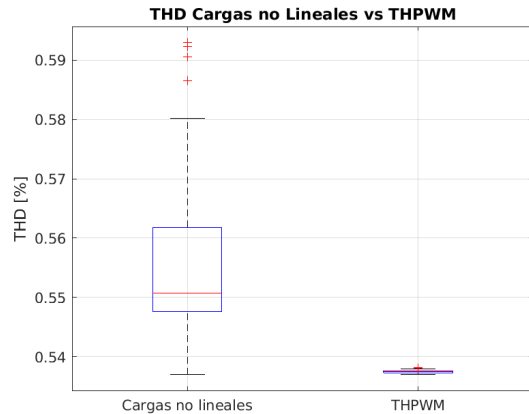
La implementación de DG con la modulación THPWM logra un incremento considerable en el perfil de voltaje como se puede observar en la figura 9.



**Figura 9.** Comparación de Voltaje en la barra 25 de los casos 3.3.1 vs 3.3.2.

Mientras que su porcentaje de THD disminuye en menor proporción, como la figura 10 lo indica, los valores de THD del caso 3.3.2 son similares entre todas

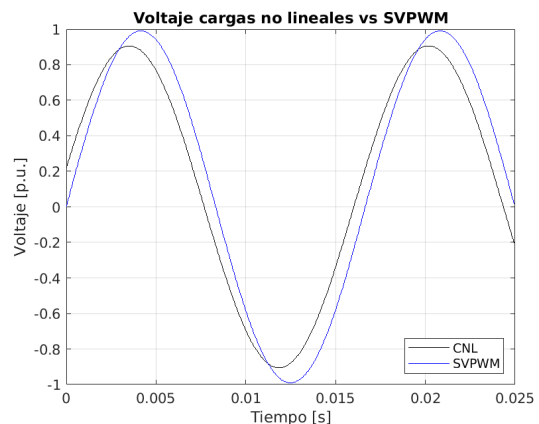
las barras del sistema, incluso siendo menores que la mediana de THD del caso 3.3.1, oscilando entre los valores extremos inferiores. Ya que en el caso 3.3.1 el valor de THD de la barra de referencia, se encuentra fuera de los extremos, siendo un valor atípico. En este caso, siendo uno de los tres valores más altos de la tabla 6.



**Figura 10.** Comparación de THD caso 3.3.1 vs 3.3.2.

### 4.2 Análisis y comparación de resultados, casos de estudio 3.3.1 y 3.3.3.

Al igual que el punto 4.1 la integración de DG con modulación SVPWM logra un aumento considerable en el perfil de voltaje como se muestra en la figura 11.



**Figura 11.** Comparación de Voltaje en la barra 25 de los casos 3.3.1 vs 3.3.3.

En cambio, el porcentaje de THD disminuye en una mayor proporción, en comparación del caso 3.3.1. Como se observa en la figura 12, la mediana de

THD de la modulación SVPWM se encuentra fuera de los valores extremos inferiores del caso 3.3.1, incluso el valor atípico más bajo, es el valor de THD de la barra 25. Mientras que en el otro caso de estudio el valor de THD de la barra 25 es el valor atípico más alto.

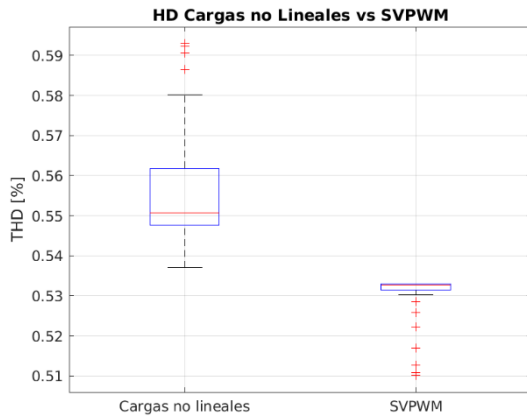


Figura 12. Comparación de THD caso 3.3.1 vs 3.3.3.

### 4.3 Análisis y comparación de resultados, casos de estudio 3.3.2 y 3.3.3.

Al comparar las dos técnicas de modulación, el perfil de voltaje es casi idéntico, como se muestra en la figura 13. El porcentaje de THD por otro lado, tiene una variación considerable.

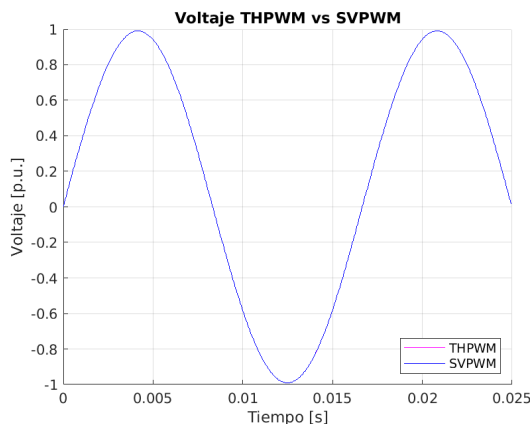


Figura 13. Comparación de Voltaje en la barra 25 de los casos 3.3.2 vs 3.3.3.

La modulación THPWM logra estabilizar el valor en todas las barras del sistema, mientras que SVPWM logra una disminución mayor de THD, ya que logra

el valor más bajo de THD en todo el trabajo de investigación, siendo el valor atípico del extremo inferior. Como se observa en la figura 14, todos los valores de SVPWM están por debajo de la mediana de THPWM, logrando así una mayor estabilidad en los parámetros de estabilidad en la red.

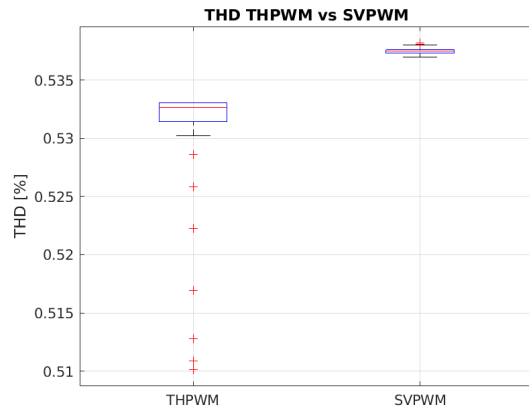


Figura 14. Comparación de THD caso 3.3.2 vs 3.3.3.

## 5 Conclusiones

El presente trabajo realiza, ejecuta y simula la implementación de dos técnicas de modulación en inversores de potencia para la eliminación de THD, tomando como referencia la barra 25 del sistema.

- En el caso de estudio 3.2.1 se observa en la tabla 3 en comparación con el caso 3.2.2, tabla 5, existe un incremento considerable del 8.5% en el perfil del voltaje mientras que en el THD disminuyó en 8.88%.
- En el caso de estudio 3.2.1 se observa en la tabla 3 en comparación con el caso 3.2.3, tabla 7, existe un incremento idéntico al caso anterior del 8.5% en el perfil del voltaje mientras que en el THD disminuyó en 13.17%.
- Las dos técnicas de modulación en la DG integrada al sistema propuesto tanto THPWM como SVPWM, en efecto mejora los perfiles de voltaje con eficacia similar del 8.5%.

- SVPWM logra una mayor disminución del THD siendo 4.28% mayor a THPWM. Esto quiere decir que, esta técnica de modulación hace el sistema mucho más confiable.
- La aplicación de DG a lo largo del sistema brinda una mejor calidad de la energía, además de ofrecer mayor confiabilidad al sistema. Su posición, como su dimensión afectan directamente en el comportamiento del sistema.

## 6 Recomendaciones

- Para la modulación SVPWM se debe tomar en cuenta el tiempo de trabajo del inversor, ya que, al ser sistemas grandes, la simulación no puede ser continua, debe ser discreta, por tanto, necesita un tiempo de muestro. Y para bloques de simulación discreta, el tiempo de muestro tiene que ser similar al tiempo de trabajo del inversor. Ya que este tiempo es el que regirá en todo el sistema.
- Para ampliar el estudio de minimización de THD en sistemas de distribución, se pueden realizar comparativas de otras técnicas de control en inversores de potencia. O a su vez, realizar un estudio dinámico de Carga del sistema y de posicionamiento de la Generación Distribuida.

## 7 Trabajos Futuros

Los resultados mostrados en este trabajo permiten desarrollar investigaciones relacionadas a futuro, tales como:

- Optimización de parámetros de estabilidad en una red de distribución mediante controladores DC-AC con aplicación de cargas dinámicas.

- Optima ubicación de generación distribuida en redes de distribución con alto contenido armónico.
- Minimización de perturbaciones en redes de distribución aplicando control dinámico espacio vectorial.

## 8 Referencia

- [1] J. A. Suárez, G. F. Di Mauro, and D. A. C. Agüero, "Análisis de la distorsión armónica y los efectos de atenuación y diversidad en áreas residenciales," vol. 3, no. 5, pp. 429–435, 2005.
- [2] J. C. Durán, D. Raggio, H. P. Socolovsky, M. Videla, and J. Plá, "Evaluación de la calidad de la energía en dos casos de estudio: distorsión armónica inyectada por un sistema fotovoltaico de 40 kw y emitida por las cargas de una vivienda unifamiliar," *XXXIX Reun. Trab. la Asoc. Argentina Energías Renov. y Medio Ambient. (ASADES)(La Plata, 2016)*, vol. 20, pp. 1–12, 2016.
- [3] IEEE Power Electronics Society and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *High Power DC/AC/DC Converter Based on Different Modulation Strategies*. .
- [4] L. Mehigan, J. P. Deane, B. P. Ó. Gallachóir, and V. Bertsch, "A review of the role of distributed generation (DG) in future electricity systems," *Energy*, vol. 163, pp. 822–836, 2018.
- [5] S. Ioannou, M. C. Argyrou, M. Darwish, and C. C. Marouchos, "Modulation Processes in Power Electronic Converters," *UPEC 2020 - 2020 55th Int. Univ. Power Eng. Conf. Proc.*, pp. 1–6, 2020.

- [6] L. Alhafadhi and J. Teh, "Advances in reduction of total harmonic distortion in solar photovoltaic systems: A literature review," *Int. J. Energy Res.*, vol. 44, no. 4, pp. 2455–2470, 2020.
- [7] S. R. Castaño, "Redes de Distribución de Energía," 2004.
- [8] J. Ordoñez and L. Nieto, "Mantenimiento De Sistemas Electricos De Distribucion," pp. 48–59, 2010.
- [9] D. J. Montaguana Cargua and D. F. Pazmiño Granda, "Evaluación de los sistemas de análisis técnicos existentes en el sector eléctrico de distribución," 2011.
- [10] G. Ye, "Power Quality in Distribution Networks: Estimation and Measurement of Harmonic Distortion and Voltage Dips."
- [11] ARCONEL, "Regulación No. CONELEC 004/01 1," pp. 1–7, 2012.
- [12] N. O. Sandoval Zuñiga, "Desarrollo de un programa para flujo de potencia para redes de distribución ligeramente malladas y generación distribuida," *Ingenius*, no. 4, pp. 82–89, 2010.
- [13] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *An Evaluation Index of Voltage Stability of Distribution Network Considering DG*.
- [14] J. Jativa, Jorge; Buchelli, "Impacto De La Generación Distribuida En La Estabilidad Del Voltaje En Los Sistemas De Distribución," 2020.
- [15] S. Essallah and A. Khedher, "Optimization of distribution system operation by network reconfiguration and DG integration using MPSO algorithm," *Renew. Energy Focus*, vol. 34, no. 00, pp. 37–46, 2020.
- [16] R. Pereira, O. Llerena, W. De Queiróz, and J. Silveira, "A Technical Study of Solar and Biogas Energy Usage in Electric Vehicles in Ilhabela, Brazil," *Ingenius*, no. 20, pp. 58–69, 2018.
- [17] R. Bright, "Basic Photovoltaic principles and Methods," *Electron. Prod. (Garden City, New York)*, vol. 50, no. 3, 2008.
- [18] P. J. Del Rio Pinilla, "Control de Inversor en Puente Completo mediante Modulación SPWM," 2019.
- [19] O. Miguel-Sánchez, G. A. Anaya-Ruiz, L. G. Zuñiga-García, L. E. Ugalde-Caballero, E. L. Moreno-Goytia, and V. Venegas-Rebollar, "High-boost, resonant-type DC-DC converters at power interfaces for interconnecting DC generation to AC main grids," *2016 IEEE Int. Autumn Meet. Power, Electron. Comput. ROPEC 2016*, no. Ropec, 2017.
- [20] G. Gallegos and W. Manuel, "Análisis de las técnicas modernas de modulación aplicadas a los sistemas CD/CA," 2012.
- [21] M. Maldonado, "Análisis Comparativo de Técnicas adaptativas aplicadas a la eliminación eficiente de armónicos en inversores de potencia.," *Orozco Tupacyupanqui*, 2018.
- [22] C. X. Reyes Pérez and J. P. Moya Velasco, "Desarrollo de un inversor Trifásico con modulación SPWM e interfaz gráfica para el laboratorio de Electrónica de Potencia,"



- Universidad Politécnica Salesiana, 2016.
- [23] T. Lifang, "Study of the SVPWM converter based on TMS320F24X," in *Proceedings of the 2013 3rd International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications, ISDEA 2013*, 2013, pp. 1316–1319.
- [24] H. F. Vivas Díaz, "Estudio de inversores trifasicos de AC en montacargas electricos de DC," 2008.
- [25] S. Seguí Chilet, R. Masot Peris, S. Orts Grau, and F. J. Gimeno Sales, "Control vectorial de inversores trifásicos," *Revista española de electrónica*, no. 582, pp. 66–72, 2003.
- [26] K. V. Kumar, P. A. Michael, J. P. John, and S. S. Kumar, "Simulation and Comparison of Spwm and Svpwm Control for Three Phase Inverter," *ARPJ. Eng. Appl. Sci.*, vol. 5, no. 7, pp. 61–74, 2010.
- [27] G. Sybille and H. Le-Huy, "Digital simulation of power systems and power electronics using the MATLAB/Simulink Power System Blockset," *2000 IEEE Power Eng. Soc. Conf. Proc.*, vol. 4, no. c, pp. 2973–2982, 2000.
- [28] M. Jaramillo and L. Tipán, "Comparative analysis of DG units against Capacitive banks in a micro-grid as an alternative for voltage profile enhancement," in *2020 IEEE International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*, 2020, pp. 261–267.
- [29] L. Chaturvedi, D. K. Yadav, and G. Pancholi, "Comparison of SPWM, THIPWM and PDPWM technique based voltage source inverters for application in renewable energy," *J. Green Eng.*, vol. 7, no. 1–2, pp. 83–98, 2017.
- [30] W. Shah and R. L. Biate, "Design and Simulation of Solar PV Model Using Matlab/Simulink," *Int. J. Sci. Eng. Res. Vol. 7, Issue 3, March-2016 ISSN 2229-5518*, vol. 7, no. 3, pp. 551–554, 2016.
- [31] C. A. Muñoz Silva, "Comparativa de las técnicas de inyección del tercer armónico y onda sinusoidal con triangular en inversores de potencia y su impacto sobre los parámetros de estado estable en una red de distribución," Quito, 2020.

## 9 Estado del Arte

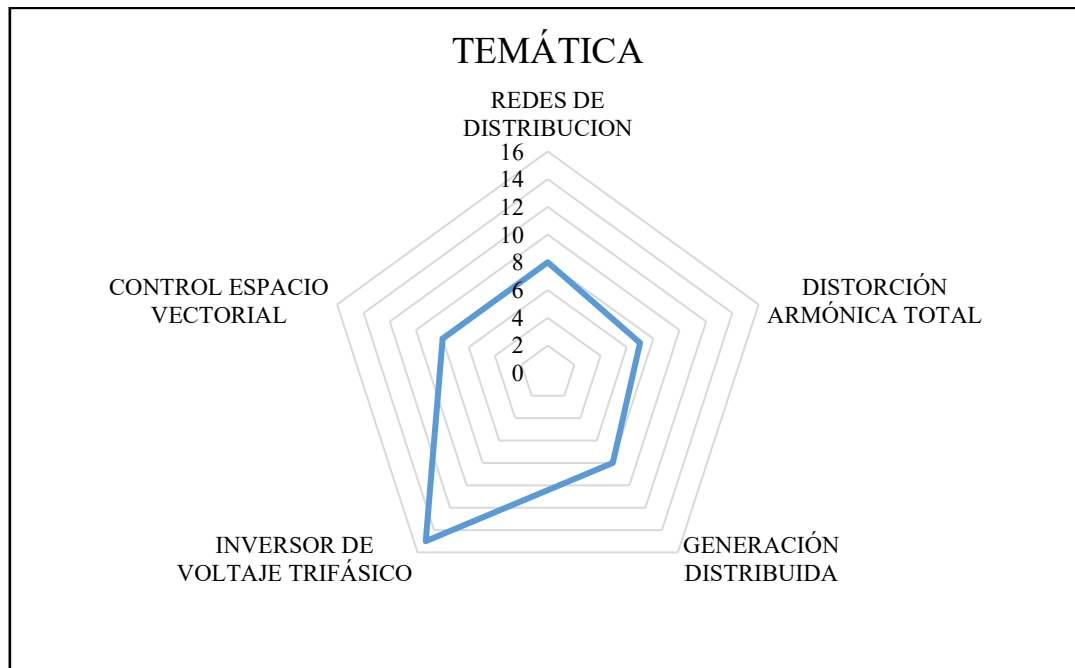
Tabla 11. Matriz de estado del arte.

ITEM	DATOS				TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA		
	AÑO	TÍTULO DEL ARTICULO	PAÍS	CITAS	REDES DE DISTRIBUCION	DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL	GENERACIÓN DISTRIBUIDA	INVERSOR DE VOLTAJE TRIFÁSICO	CONTROL ESPACIO VECTORIAL	ESTABILIDAD DE LA RED	PERDIDAS DEL PERFIL DE VOLTAJE	EFICIENCIA DE INVERSIÓN	PERTURBACIONES EN EL SISTEMA	ACOPLACIÓN A LA RED	CAPACIDAD DE GENERACIÓN	GENERACIÓN DE ARMONICOS	IMPLEMENTACION SISTEMA DE PRUEBA	TECNICAS DE MODULACIÓN	SIMULACIÓN	IMPLEMENTACION DG	MODULACIÓN SPWM	EVALUACION DE THD Y PERFILES DE VOLTAJE
1	2005	Análisis de la distorsión armónica y los efectos de atenuación y diversidad en áreas residenciales	Argentina	46	X	X				X	X		X			X			X			X
2	2016	Evaluación de la calidad de la energía en dos casos de estudio: distorsión armónica inyectada por un sistema fotovoltaico de 40 kw y emitida por las cargas de una vivienda unifamiliar	Argentina	2		X	X			X	X		X	X	X	X			X	X		X
3	2016	High Power DC/AC/DC Converter Based on Different Modulation Strategies	China	4				X		X		X		X				X	X			
4	2018	A review of the role of distributed generation (DG) in future electricity systems	Irlanda	85			X			X				X						X		
5	2020	Modulation Processes in Power Electronic Converters	inglaterra	0				X	X			X	X					X			X	
6	2020	Advances in reduction of total harmonic distortion in solar photovoltaic systems	Malasia	7				X	X	X			X			X						X
7	2004	Redes de Distribución de Energía	Colombia	136	X					X							X					
8	2010	Mantenimiento De Sistemas Electricos De Distribucion	Ecuador	7	X					X			X				X					
9	2011	Evaluación de los sistemas de análisis técnicos existentes en el sector eléctrico de distribución	Ecuador	0	X					X			X				X					

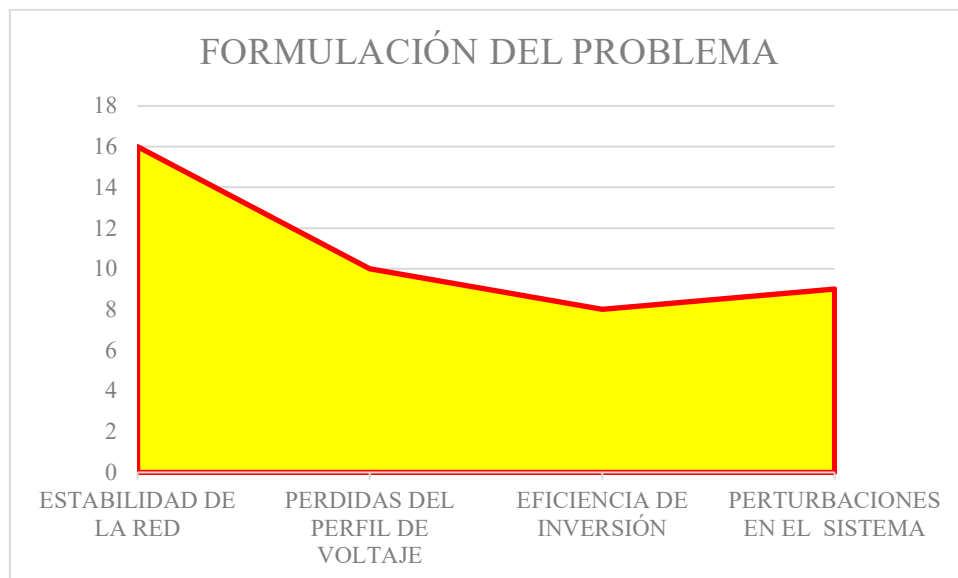
10	2017	Power Quality in Distribution Networks: Estimation and Measurement of Harmonic Distortion and Voltage Dips	Países Bajos	5	X	X		X		X	X		X			X			X			X
11	2001	Regulación No. CONELEC 004/01 1	Ecuador	0		X				X					X							
12	2010	Desarrollo de un programa para flujo de potencia para redes de distribución ligeramente malladas y generación distribuida	Ecuador	0	X		X									X		X	X			
13	2017	An Evaluation Index of Voltage Stability of Distribution Network Considering DG	China	3	X		X				X			X					X			
14	2020	Impacto De La Generación Distribuida En La Estabilidad Del Voltaje En Los Sistemas De Distribución	Ecuador	0	X		X			X	X								X			
15	2020	Optimization of distribution system operation by network reconfiguration and DG integration using MPSO algorithm	Tunez	5			X			X	X								X			
16	2018	A Technical Study of Solar and Biogas Energy Usage in Electric Vehicles in Ilhabela, Brazil	Brazil	0											X			X				
17	1982	Basic Photovoltaic principles and Methods	USA	164			X				X				X							
18	2018	Control de Inversor en Puente Completo mediante Modulación SPWM	Chile	0				X	X			X				X		X				
19	2016	High-boost, resonant-type DC-DC converters at power interfaces for interconnecting DC generation to AC main grids	México	0				X				X			X				X			
20	2012	Análisis de las técnicas modernas de modulación aplicadas a los sistemas CD/CA	Ecuador	0				X				X							X			
21	2018	Análisis Comparativo de Técnicas adaptativas aplicadas a la eliminación eficiente de armónicos en inversores de potencia	Ecuador	0		X		X		X			X			X						X
22	2018	Desarrollo de un inversor Trifásico con modulación SPWM e interfaz gráfica para el laboratorio de Electrónica de Potencia	Ecuador	1				X	X			X							X			
23	2013	Study of the SVPWM converter based on TMS320F24X	China	6				X	X									X	X		X	
24	2008	Estudio de inversores trifásicos de AC en montacargas eléctricos de DC	Colombia	0				X					X									
25	2003	Control vectorial de inversores trifásicos	España	5				X	X	X	X							X	X		X	
26	2010	Simulation and Comparison of Spwm and Svpwm Control for Three Phase Inverter	India	254				X	X	X	X							X	X		X	

27	2000	Digital simulation of power systems and power electronics using the MATLAB/Simulink Power System Blockset	Canada	90						X							X					
28	2020	Comparative analysis of DG units against Capacitive banks in a micro-grid as an alternative for voltage profile enhancement	Ecuador	0		X					X			X						X		
29	2017	Comparison of SPWM, THIPWM and PDPWM technique based voltage source inverters for application in renewable energy	India	9				X				X				X		X	X			
30	2016	Design and Simulation of Solar PV Model Using Matlab/Simulink	India	19											X				X			
31	2020	Comparativa de las técnicas de inyección del tercer armónico y onda sinusoidal con triangular en inversores de potencia y su impacto sobre los parámetros de estado estable en una red de distribución	Ecuador	0	X	X		X	X			X				X		X	X			X
CANTIDAD					8	7	8	15	8	16	10	8	9	5	5	9	5	7	16	7	4	6

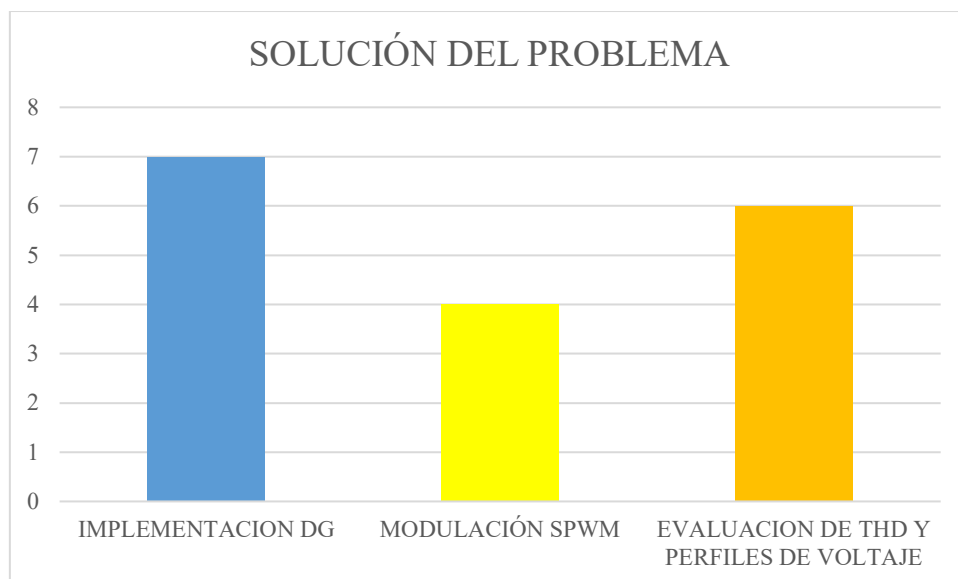
## 9.1 Resumen de Indicadores



**Figura 15.** Resumen e indicador de la temática.



**Figura 16.** Indicador de formulación de problema.



**Figura 17.** Indicador de Solución.